

罗丽娟, 熊帆, 陈悦, 等. 基于 ANSYS 和 JC 法的滑坡抗滑桩结构可靠度分析[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 33–38. [Luo Lijuan, Xiong Fan, Chen Yue, et al. Reliability Analysis of Anti-slide Pile Based on JC Method and ANSYS[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 33–38.]

基于 ANSYS 和 JC 法的滑坡抗滑桩结构可靠度分析*

罗丽娟^{1,2,3}, 熊帆¹, 陈悦¹, 夏香波¹, 王瑞¹

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062;
3. 长安大学 地下结构与工程研究所, 陕西 西安 710061)

摘要: 在深入分析可靠度指标的几何意义和 JC 法的基本原理的基础上, 构造了滑坡抗滑桩结构的功能函数。分析了陕西省吴起县大路沟巨型黄土滑坡的工程地质条件, 根据滑坡的工程地质勘察资料和滑坡治理工程的设计资料, 建立了基于 ANSYS 的抗滑桩桩土体系有限元模型, 经过自重作用下桩土结构数值的模拟, 验证了该有限元模型的有效性。在此基础上, 选取滑体土重度 γ 、滑面土内聚力 C 和内摩擦角 ϕ 、滑面以下土的压缩模量 E_s 四个随机变量, 建立了基于 ANSYS 软件和 JC 法的抗滑桩结构可靠度计算模型, 并研制了相应算法, 算例结果表明: 基于 ANSYS 和 JC 法的抗滑桩结构的失效概率 $p_f = 0.49\%$, 可靠度指标 $\beta = 2.58$, 失效概率略大于蒙特卡罗(MCS)抽样算法结果和 CCD 响应面法(RSM)结果, 但是基于 ANSYS 和 JC 法的效率最高, 从而验证了该可靠度模型及算法的有效性。

关键词: 可靠度; JC 法; 抗滑桩; 黄土滑坡; ANSYS

中图分类号: P642.22; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2016)01-0033-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.01.008

在我国, 滑坡是威胁人民生命财产安全的主要地质灾害之一。据中国地质环境监测院统计数据, 2014 年全国共发生地质灾害 10 907 起, 共造成 349 人死亡、218 人受伤、51 人失踪, 直接经济损失 54.1 亿元, 其中滑坡 8 128 起, 占地质灾害总数的 74.5%。据统计, 近 20 年来, 我国每年因为地质灾害造成的经济损失高达 200 多亿元^[1]; 滑坡治理一直是我国地质灾害防治的重要任务, 抗滑桩作为一种常见的滑坡治理方案得到广泛应用^[2]。

在完善辅助工程措施的基础上, 滑坡防治工程向轻型化、复合型和机械化施工方向发展, 基于可靠度的滑坡防治是这种发展方向的重要实践。国内外在研究滑坡(边坡)基于矩方法的稳定性可靠度和支护方案优化设计方面做了大量工作, 并取得了许多重要成果。在边坡(滑坡)稳定性的可靠度计算方面取得的主要成果如下所示。杨令强等^[2]利用反演分析和考虑残差的最小二乘拟合的方法确定断层粘聚力, 反分析确定出抗滑桩的抗力统计参数, 利用离散化降维解法求得边坡稳定的可靠度指标。还有许多科技工作者^[3-5]用一次二阶矩方法评价边坡稳定性可靠度。吴明坤等^[6]基

于强度折减, 建立位移迭代有限元模型模拟桩-土间的相互作用, 基于强度折减的位移迭代有限元法对边坡抗滑桩加固工程进行可靠性分析。

近年来, 许多学者将结构可靠度的矩方法应用于地下结构和岩土工程构筑物的可靠度分析, 主要有将一次二阶矩与拉普拉斯渐进法相结合在验算点处作二次展开^[7]、一次二阶矩验算法及其改进^[8-9]、二次二阶矩法^[10]、剩余推力法与 JC 法的相结合^[11]等等。范雷、唐辉明等^[12]引入二元函数插值逼近的一次二阶矩方法对边坡稳定性可靠度进行了分析。有的学者在岩土工程参数敏感性方面进行了研究, 取得了许多成果^[13-15], 还有学者对桩基^[16]、挡土墙结构^[17]、基坑支护结构^[18]的可靠度计算方法进行了研究。

滑坡的剩余下滑力是作用在抗滑桩结构上的荷载, 剩余下滑力的大小主要由滑体自重、滑面的抗剪强度及滑面形态决定, 荷载的大小及分布决定了结构的尺寸和强度要求。从可靠度的角度来看, 滑面土的抗剪强度指标及其统计分布对大型滑坡的治理成本和抗滑结构的可靠性起决定作用。怎样在滑坡治理工程的造价经济性与结构可靠性之间寻找最优解是工程界和广大学者共同关

* 收稿日期: 2015-07-01 修回日期: 2015-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202190); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(2013G3282014; 2014G2260009)

作者简介: 罗丽娟(1973-), 女, 山西平遥人, 博士(后), 副教授, 主要从事边坡(滑坡)工程与桩基工程等方面的教学和科研研究。E-mail: luojuan@chd.edu.cn

心的问题。

基于以上背景,作者对某黄土滑坡滑带土的抗剪强度指标、滑体土的重度等开展了大量的室内实验和统计分析和工作,得到了滑体和滑面土的有关随机变量的统计分布特征,在此基础上,基于 ANSYS 和 JC 法对抗滑桩结构进行了可靠度分析。

1 基于 JC 法的抗滑桩可靠度理论

1.1 JC 法的基本原理

定义抗滑桩结构极限状态功能函数 Z 为:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (1)$$

式中: X_1, X_2, \dots, X_n 为服从正态分布的基本随机变量, $X_i \sim N(\mu_{X_i}, \sigma_{X_i}^2)$, ($i = 1, 2, \dots, n$), $\mu_{X_i}, \sigma_{X_i}^2$ 分别为 X_i 的均值和方差。将极限状态功能函数 Z 用 Taylor 级数在验算点 X_i^* 上展开,近似地取其一阶项,从而得到结构的极限状态方程 Z 为:

$$Z = g(X_1^*, X_2^*, \dots, X_n^*) + \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{P^*} (X_i - X_i^*). \quad (2)$$

则可定义结构可靠指标 β 为:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{P^*} (\mu_{X_i} - X_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{P^*} \sigma_{X_i} \right)^2}} \quad (3)$$

式中: P^* 为 $n+1$ 维正态空间 (Z, X_1, X_2, \dots, X_n) 中极限状态超曲面 $Z=0$ 上的任意验算点; \mathbf{x}_i^* 为坐标向量 ($z^*, x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$) = 0 中第 i 个分量。

若将基本随机变量 X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 进行标准正态化,即:

$$Y_i = \frac{X_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}}, Y_i \sim N(0, 1) \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (4)$$

则原极限状态方程 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$ 转化为 $Z' = f(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) = 0$, 极限状态超曲面 $Z=0$ 上任意一点 P 在 $n+1$ 维正态空间 (Z, X_1, X_2, \dots, X_n) 中的坐标向量为 (z, x_1, x_2, \dots, x_n) 在 $n+1$ 维标准正态空间 (Z', Y_1, Y_2, \dots, Y_n) 中的坐标向量为 (z', y_1, y_2, \dots, y_n) 它们是一一对应的,即:

$$y_i = \frac{x_i - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} (i = 1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

$n+1$ 维空间 (Z', Y_1, Y_2, \dots, Y_n) 中极限状态超曲面 $Z'=0$ 上任意验算点 P'^* 的坐标向量为 ($z'^*, y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*$) = 0, 则有:

$$\left. \begin{aligned} \beta^2 &= \sum_{i=1}^n y_i^{*2} \\ f(y_1^*, y_2^*, y_3^*, \dots, y_n^*) &= 0 \\ g(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

P'^* 到坐标原点 O' 的距离为:

$$d = \left(\sum_{i=1}^n y_i^{*2} \right)^{1/2} = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i^* - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (7)$$

因此,可靠度指标 β 的几何意义就是 $n+1$ 维标准正态空间 (Z', Y_1, Y_2, \dots, Y_n) 的坐标原点 O' 到极限状态超曲面 $Z'=0$ 的最短距离,即

$$\beta = \min(d). \quad (8)$$

由此可得到结构失效概率 $P_f = \Phi^{-1}(\beta)$, 见图 1。

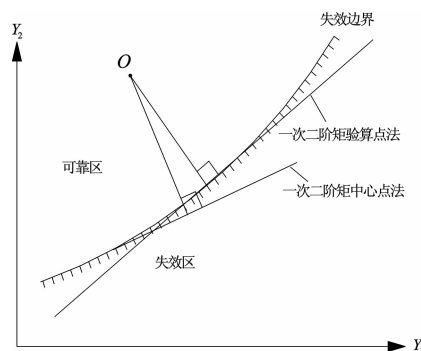


图 1 失效边界与中心点的关系

在抗滑桩可靠度分析中,通常有多个基本随机变量,当随机变量为非正态变量时,采用 R-F 变换方法可以将非正态变量当量正态化^[19]。

在一次二阶矩验算点法中,当基本随机变量 X_i, X_j 之间相互独立时,则 Z 与 Z' 的均值、标准差分别表示为:

$$\mu_Z = \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{P^*} (\mu_{X_i} - X_i^*); \quad (9)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_{P^*} \sigma_{X_i} \right)^2}; \quad (10)$$

$$\mu_{Z'} = - \sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial f}{\partial Y_i} \right|_{P'^*} Y_i^* \right); \quad (11)$$

$$\sigma_{Z'} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\left. \frac{\partial f}{\partial Y_i} \right|_{P'^*} \right)^2}. \quad (12)$$

当基本随机变量 X_i, X_j 之间不相互独立时,要考虑相关系数的影响^[19],可靠度指标 β 仍然用下式计算:

$$\beta = \frac{\mu_{Z'}}{\sigma_{Z'}} \text{ 或 } \beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z}. \quad (13)$$

1.2 抗滑桩结构的功能函数

实际工程中,钢筋混凝土抗滑桩失效模式多数由于抗滑桩结构受拉侧拉应变超过允许值,本文算例中混凝土强度等级为 C30, 热轧钢筋为 HRB400, 分别根据混凝土和钢筋的抗拉强度设计值、弹性模量计算得到混凝土极限拉应变 $\varepsilon_{cu} = 3.3 \times 10^{-3}$ 、钢筋极限拉应变 $\varepsilon_y = 1.8 \times 10^{-3}$ 。综合考虑结构抗力的安全性,取抗滑桩结构允许拉应变为 $[\varepsilon] = 1.0 \times 10^{-3}$, 当桩身结构受拉侧最大拉应变 $\varepsilon_{y, \max} = 1.0 \times 10^{-3}$ 时,认为桩身结构达到极限状态,因此,定义滑桩结构功能函数为:

$$Z = \max(\varepsilon) - 1.0 \times 10^{-3}. \quad (14)$$

式中: $\max(\varepsilon)$ 为抗滑桩结构最大正应变 $\varepsilon_{y, \max}$ 。

2 抗滑桩桩土体系有限元计算

2.1 工程背景

现以陕西省吴起县大路沟滑坡治理工程抗滑桩结构为工程背景。大路沟滑坡属老滑坡,受坡脚路堑工程开挖(滑坡体中部、上部为多级旱地,中下部被人工开挖为 11 级台阶)的影响形成体积

约 $856.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的大型滑坡。地形陡峻、南低北高, 沟谷切割深度大, 呈深窄的“V”型断面, 属于黄土梁峁谷坡地貌; 滑坡总体纵向坡度约 30° 。滑坡体海拔介于 $1\,505 \sim 1\,630 \text{ m}$ 之间, 相对高差 125 m ; 滑坡体长约 350 m , 宽约 400 m , 平面约 $15.2 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。大路沟滑坡全貌见图 2。

该滑坡治理方案的主要挡土结构为抗滑桩, 桩截面分为 $1.5 \times 2.0 \text{ m}$ 、 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 、 $2.5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ 等几种形式, 桩长分别有 20 m 、 24 m 、 26 m 等三种, 纵断面工程结构布置见图 3。

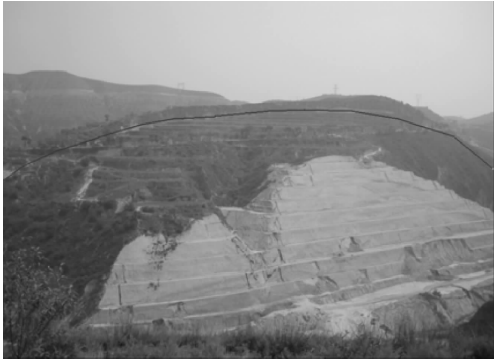


图 2 大路沟滑坡全貌图(镜向 65°)

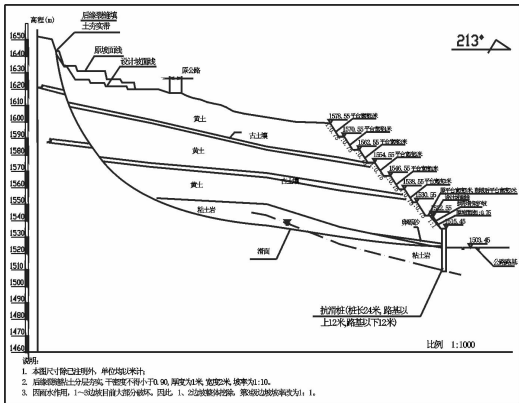


图 3 大路沟滑坡纵断面工程结构布置图

大路沟滑坡各地层(岩性)由新到老依次描述如下:

(1)第四系(Q)——马兰黄土; 离石黄土; 浅灰色、黄色冲积粉土、粉质粘土, 局部含有卵石;

(2)新生界新近系保德组(N_2b)——主要为深红或紫红、棕红色粘土岩(或砂质粘土岩), 含钙质结核, 但层理不明显;

(3)中生界白垩系华池组(K_1h)——上部为强~中等风化棕红色块状细粒长石砂岩; 中部可见棕褐色泥岩、咖啡色页岩、砂质泥岩(或泥岩)互层; 下部为棕红~暗红色厚层块状细粒长石砂岩, 夹有咖啡色粉砂质泥岩。各土层物理指标的统计平均值如表 1 所示。

2.2 基于 ANSYS 的有限元模型

现以桩长为 20 m , 截面尺寸为 $1.5 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ 的抗滑桩为例, 采用大型通用有限元软件 ANSYS 建立滑坡抗滑桩桩土体系有限元模型^[20]。以桩身结构、滑体及滑面为主要研究对象, 不考虑钢筋混凝土材料的非线性, 假定钢筋混凝土桩为均质线弹性体, 采用钢筋混凝土均质体等效模型建模; 不考虑地下水渗流、地震作用的影响, 为方便后续可靠度的计算, 暂考虑二维问题; 抗滑桩截面为矩形, 数值模型中桩截面高度和宽度根据桩间距换算得到, 桩长取工程桩实际长度; 滑带土体、滑床、滑体采用 D-P 弹塑性模型; 考虑桩侧、桩端与土的接触, 桩与土变形协调, 交界面无滑移; 滑体与滑床之间设置为接触单元。

因大路沟滑坡表面形态较复杂, 为便于有限元模型的建立, 对滑坡纵断面表面形态(见图 3)作适当简化。根据勘察、设计资料, 该滑坡的几何模型及结构尺寸等参数见表 2; 该有限元模型中各土层物理指标见表 1; 桩体、滑体及滑床材料计算参数见表 3; 桩侧与桩侧土体、桩端与桩端土体、滑体与滑床界面处接触单元和参数设置见表 4。据此所构建的有限元模型共划分 2 713 个节点、63 个接触单元、2 661 个单元, 有限元模型单元网格见图 4。

表 1 土的物理指标统计平均值									
土层号	含水率 $w/\%$	天然重度 / (kN/m^3)	干重度 / (kN/m^3)	比重 G	孔隙比 e	孔隙度 $n/\%$	饱和度 $S_r/\%$	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$
①黄土	12.17	16.83	14.98	2.70	0.77	43.44	43.93	27.44	17.65
②古土壤	17.52	18.76	15.94	2.71	0.67	39.90	71.61	28.93	17.79
③黄土	16.18	17.43	14.97	2.70	0.77	43.50	58.09	27.27	17.40
④古土壤	18.84	19.06	16.04	2.70	0.66	39.54	78.44	26.93	16.48
⑤黄土	17.99	19.27	16.31	2.71	0.63	38.43	77.78	27.39	16.83
⑥古土壤	19.63	19.73	16.49	2.71	0.61	37.85	87.24	28.23	17.31
⑦黄土	18.73	18.94	15.93	2.70	0.67	39.91	77.38	27.73	17.19
⑧红粘土	21.24	19.15	15.78	2.72	0.69	40.68	84.20	32.18	19.49

表 2 滑坡几何模型及结构尺寸参数						
坡高/m	坡度/ $(^\circ)$	桩长/m	悬臂段桩长/m	桩截面大小/($\text{m} \times \text{m}$)	模型几何边界/($\text{m} \times \text{m}$)	滑面形态
44.0	56.0	20.0	6.0	1.5×2.0	270×110	圆弧形

表 3 桩体、滑体及滑床材料计算参数						
材料类别	重度 γ/kNm^{-3}	弹性(压缩)模量 E_s/MPa	泊松比 μ	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	内聚力 c/kPa	膨胀角 $\psi/(^\circ)$
桩体	25.00	34 122	0.18	—	—	—
滑体	17.00	15.0	0.32	26.3	28.3	15.0
滑床	18.00	15.0	0.30	13.7	41.0	10.0
滑带	18.00	9.75	0.35	6.0	8.0	5.0

注: 表中“—”表示没有该项数据。

表 4 接触单元和参数设置表

名称	单元类型		参数
	接触面	目标面	
桩侧与土	CONTA171	TARGE169	摩擦系数 $\mu = 0.30$ KEYOPT, , 9, 0 KEYOPT, , 12, 2
桩端与土	CONTA171	TARGE169	摩擦系数 $\mu = 0.30$ KEYOPT, , 9, 0 KEYOPT, , 12, 2
滑体与滑床接触面	CONTA171	TARGE169	摩擦系数 $\mu = 0.15$ KEYOPT, , 9, 2 KEYOPT, , 10, 2 KEYOPT, , 12, 0

表 5 随机变量统计特征值

随机变量	滑体重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	滑面土内聚力 γ/kPa	滑面土内摩擦角 $C/(\text{°})$	滑床土压缩模量 E_s/MPa
分布类型	正态	对数正态	正态	正态
均值	16.77	8.00	6.00	12.82
标准差	1.268	0.800	1.200	3.279

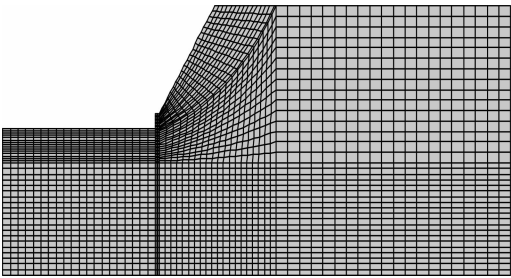


图 4 有限元模型单元网格图

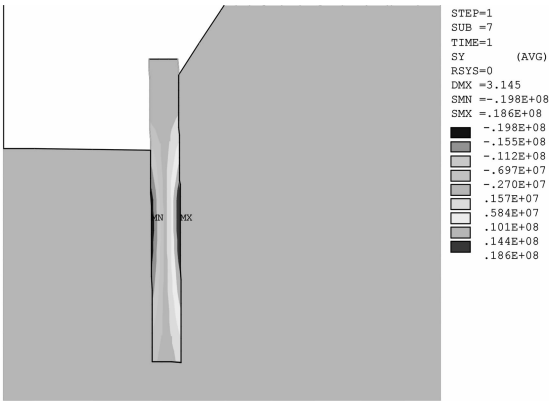


图 6 桩体 Y 方向正应力 σ_y 云图

2.3 计算分析

为了计算土体自重作用下滑坡体的变形，设置如下边界条件：左右两侧限制水平方向位移，取 $U_x = 0$ ；底部边界限制竖向位移，取 $V_y = 0$ ；顶部边界设为自由边界。有限元模型计算得到的 Y 方向位移云图见图 5。

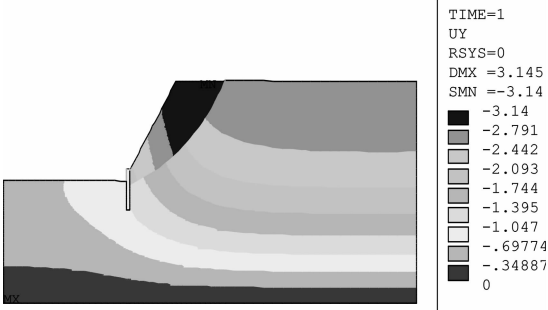


图 5 Y 方向位移 V_y 云图

由图 5 可知：自重作用下，滑体和滑床沿滑面的相对滑移非常突出，且剪出口和滑坡后壁相对位置明显，显示整体滑动明显。

桩体 Y 方向正应力 σ_y 云图见图 6。

由图 6 可知：桩背侧受拉明显，最大拉应力达 18.6 MPa，桩前侧受压明显，最大压应力为 19.8 MPa，抗滑桩符合受弯变形特征，但受弯受压区范围有限，显示桩长安全储备偏大。图 5 和图 6 显示了该抗滑桩桩土有限元模型的有效性。

3 基于 JC 法的抗滑桩可靠度计算

3.1 抗滑桩桩土结构体系的随机变量特征

在抗滑桩桩土结构体系中，桩身结构所受荷载为滑坡体剩余下滑力，桩身结构抗力的发挥由桩身嵌固段围岩反力提供。因滑坡岩土体的物理力学性质指标的获得具有不确定性，导致抗滑桩结构设计成果具有一定的失效风险。滑坡的下滑力主要是滑体自重 γ 提供的，抗滑力主要由滑带土内摩擦角 φ 和内聚力 C 控制(不考虑滑坡形态带来的影响)，抗滑桩抗力的发挥与滑面以下土层的压缩模量 E_s 有关，因此，本文主要考虑此 4 个随机变量对抗滑桩结构可靠度的影响。采用 SPSS 软件对此四个随机变量作统计分析，经拟合、K-S 假设检验后得到滑面及滑体各随机变量的统计分布及特征值见表 5。

3.2 基于 ANSYS 和 JC 法的抗滑桩可靠度分析

基于 ANSYS 和 JC 法求解抗滑桩可靠度主要思路为：可靠度计算采用基于 JC 法的 FORTRAN 源程序(Relia-JC.FOR)，抗滑桩有限元模型是基于 ANSYS 建立的，FORTRAN 源程序(Relia-JC.FOR)

所需要调用的功能函数值是通过调用 ANSYS 命令流文件 PR2D. txt 实现返回桩身最大正应变 $\varepsilon_{y,\max}$ 。

其相应的过程:源程序(Relia-JC. FOR)将随机变量取值写入 PRINPUT. TXT, FORTRAN 源程序(Relia-JC. FOR)执行至调用 ANSYS 命令流文件,通过执行 * VREAD, HMC(1), 'PRINPUT', 'TXT', 实现对几何模型和有限元模型参数(随机变量)赋值, ANSYS 计算结束后,通过 * VWRITE, MAXSTRY 将桩身最大正应变(可靠度计算中功能函数组成部分) MAXSTRY ($\varepsilon_{y,\max}$) 写入至 PROUT. TXT 文件中,供 FORTRAN 源程序(Relia-JC. FOR)调用传递抗滑桩结构功能函数值。

基于 ANSYS 和 JC 法计算可靠度流程见图 7。

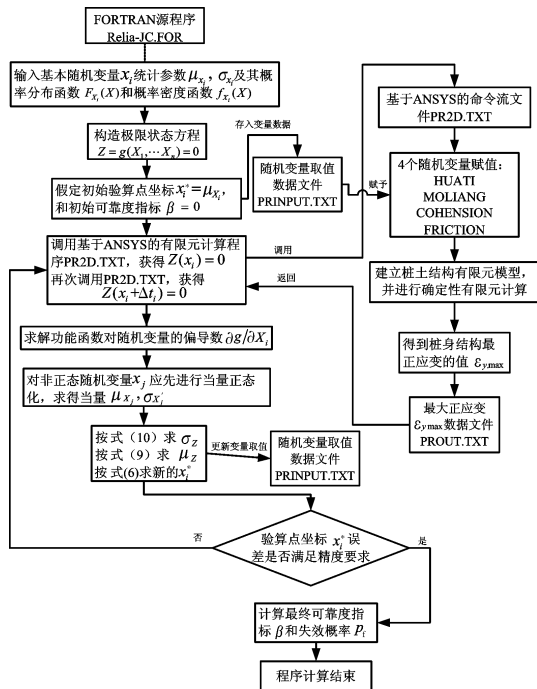


图7 基于 JC 法和 ANSYS 的抗滑桩可靠度计算流程图

FORTRAN 语言源程序(Relia-JC. FOR)对 ANSYS 命令流文件 PR2D. txt 主要的调用语句如下:

LOGICAL(4) result

result = SYSTEMQQ('C: \ Program Files \ Ansys Inc \ v90 \ ANSYS \ bin \ intel \ ANSYS90-b-p ane3fl-i D: \ program \ PILE RELIA \ PR2D. txt -o D: \ program \ PILE RELIA \ PROUT. TXT')

基于 ANSYS 软件计算抗滑桩结构功能函数的命令流文件 PR2D. txt 的主要命令流如下:

! (1) 定义相关变量参数

/CLEAR

* DIM, HMC(1), ARRAY, 4! 定义四个随机变量组成的数组

! 定义 HUATI, MOLIANG, COHENSION, FRICTION 变量

* CREATE, TEMP1 ! 创建临时宏文件 TEMP1

* VREAD, HMC(1), 'PRINPUT', 'TXT' ! 随机变量读入

(F7.2, /, E7.2, /, F8.2, /, F5.2)! 格式同 PRINPUT. TXT 格式

* END ! 结束宏文件

/INPUT, TEMP1 ! 四个随机变量赋值

/PREP7

! (2) 定义单元类型、实常数、材料属性

ET, 2, PLANE182 ! 周围土体实体单元

MP, EX, 1, 3.4122E10 ! 抗滑桩结构弹模、泊松比、密度 MP, PRXY, 1, 0.18

MP, DENS, 1, 2500

MP, EX, 2, 1.5E7 ! 滑床及桩前土压缩模量、泊松比、密度

MP, PRXY, 2, 0.30

MP, DENS, 2, 1800

TB, DP, 2 ! DP 模型

TBDATA, 1, 41.0, 13.7, 10.0

MP, EX, 3, 1.5E7 ! 滑体土体压缩模量、泊松比、密度

MP, PRXY, 3, 0.32

MP, DENS, 3, HUATI ! 滑体密度(随机变量)

TB, DP, 3 ! DP 模型

TBDATA, 2, 28.3, 26.3, 15.0

MP, EX, 4, MOLIANG ! 滑带土压缩模量(随机变量)

MP, PRXY, 4, 0.35

MP, DENS, 4, HUATI ! 滑带土密度(随机变量)

TB, DP, 4 ! 滑带土体内聚力和内摩擦角(随机变量)

TBDATA, 3, COHENSION, FRICTION, 5.0 !

! (3) 创建边坡及抗滑桩模型关键点(略)

! (10) 后处理

/POST1

ESEL, S, MAT,, 1 ! 提取桩身结构

PLNSOL, S, Y, 0, 1 ! 应力云图

SET, FIRST

NSORT, EP(1), Y ! 将桩身节点正应变 排序

* GET, MAXSTRY, SORT,, MAX ! 提取最大正应变

* CREATE, TEMP2 ! 定义临时宏文件 TEMP2

* CFCLOS, 'PROUT', 'TXT', ' ! 功能函数值存储文件

* VWRITE, MAXSTRY ! 写入至 PROUT. TXT 文件

(E11.3) ! 数据格式 E11.3

* CFCLOS ! 关闭 PROUT. TXT 文件

* END ! 宏结束标志

/INPUT, TEMP2 !

FINISH

3.3 可靠度计算结果分析

基于 ANSYS 和 JC 法计算结构的失效概率 $P_f = 0.49\%$, 可靠度指标 $\beta = 2.58$, 与蒙特卡洛法和响应面法计算结果对比如表 6 所示。

表 6 几种可靠度计算方法结果对比

计算方法	响应面法 RSM	蒙特卡洛法 MCS	ANSYS 和 JC 法
失效概率 $P_f/\%$	0.35	0.15	0.49
可靠度指标 β	2.70	2.94	2.58

由表 6 可知, 相同条件下计算抗滑桩结构失效概率从小到大的方法依次为: 蒙特卡洛法(MCS)、

响应面(RSM)中心复合设计法、基于 ANSYS 和 JC 法,但三种方法算得的失效概率相差不大。但是,计算效率从低到高依次为:蒙特卡洛法(MCS)、响应面(RSM)中心复合设计法(试验点数量 $N=25$)、基于 ANSYS 和 JC 法(无需抽样,仅通过数值方法实现功能函数对随机变量求偏导数)。

4 结论

本文以大路沟滑坡抗滑桩工程为算例,基于 ANSYS 建立了抗滑桩桩土体系有限元模型和抗滑桩可靠度模型,基于 ANSYS 和 JC 法进行抗滑桩可靠度计算,可得出以下几点认识。

(1) ANSYS 建模时,采用钢筋混凝土均质体等效模型建立抗滑桩结构有限元模型是可行的,建立的基于 ANSYS 和 JC 法的抗滑桩可靠度模型是有效的。

(2) 基于各方法的抗滑桩可靠度计算结果表明:蒙特卡洛法(MCS)计算得到的失效概率最小,响应面(RSM)中心复合设计法次之,基于 ANSYS 和 JC 法计算得到的失效概率最大,但三种方法算得的失效概率相差不大。蒙特卡洛法(MCS)计算效率最低,响应面(RSM)中心复合设计法次之,基于 ANSYS 和 JC 法效率最高。

参考文献:

- [1] 罗丽娟,赵法锁. 滑坡防治工程措施研究现状与应用综述[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(4): 158-164.
- [2] 杨令强,马静,张社荣. 抗滑桩加固边坡的稳定可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1299-1302.
- [3] 王建华,易朋莹,邓继辉,等. 滑坡稳定性可靠度分析[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 668-672.
- [4] 唐亚明. 基于可靠度的黄土斜坡稳定性分析[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1217-1222.
- [5] 张智洪,郑红娟. 土坡稳定性可靠度分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2007, 26(Supp. 1): 65-69.
- [6] 吴明坤,王建国,谭晓慧. 基于强度折减的边坡抗滑桩可靠性分析[J]. 工业建筑, 2011, 41(5): 99-103.
- [7] 姚泽良,李宝平,周雪峰. 结构可靠度分析的一次二阶矩方法与二次二阶矩方法[J]. 西北水力发电, 2005, 21(3): 20-23.
- [8] 李景奎,张义民. 正态分布连续体结构可靠性拓扑优化设计[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2011, 32(9): 1304-1307.
- [9] 吴雪莉,姜进,张乐民,等. 改进的一次二阶矩法在隧道可靠度中的应用[J]. 工业建筑, 2008, 38(Supp. 1): 694-697.
- [10] 宋云连,焦同战,赵海芳. 部分二次二阶矩法在公路边坡可靠度分析中的应用[J]. 公路交通科技, 2007, 24(9): 1-5.
- [11] 罗丽娟,赵法锁,胡江洋,等. 基于剩余推力法的黄土高边坡稳定性可靠度分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 27-31.
- [12] 范雷,唐辉明,胡斌,等. 二元函数逼近在斜坡可靠度分析中的应用研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 624-628.
- [13] 周艳. 重力式挡墙可靠度及其敏感度分析[J]. 国外建材科技, 2008, 29(3): 116-118.
- [14] 马德云,左勇志,霍达,等. 结构可靠性对随机参数的敏感性研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(2): 33-38.
- [15] 胡晓军,吴延枝. 抗滑桩锚固深度的可靠度与参数敏感性[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(1): 49-53.
- [16] 丁继辉,袁满,王建国. 多桩型组合桩复合地基承载力的可靠度分析[J]. 工程力学, 2008, 25(Supp. 2): 168-172.
- [17] 杜永峰,余钰,李慧. 重力式挡土墙稳定性的结构体系可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 349-353.
- [18] 尹盛斌,丁红岩. 基坑支护结构的渐近积分可靠度分析方法及应用[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3728-3732.
- [19] 胡志平,罗丽娟. 管片衬砌结构可靠度分析的优化方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4145-4150.
- [20] 王秀丽,董文燕,金兆鑫. 品字型抗滑桩对滑坡的加固效果研究[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 8-10.

Reliability Analysis of Anti-slide Pile Based on JC Method and ANSYS

Luo Lijuan^{1, 2, 3}, Xiong Fan¹, Chen Yue¹, Xia Xiangbo¹, and Wang Rui¹

(1. School of Civil Engineering, Changan University, Xi'an 710061, China;

2. Tourism and Environment College of Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China;

3. Institute of Underground Structure and Engineering, Changan University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Based on the in-depth analysis of the geometric meaning of reliability index and the basic theory of JC method, the performance function of anti-slide pile soil system is proposed. On the basis of analysis of engineering geological conditions of Dalugou loess landslide in Wuyi County Shaanxi Province, according to the landslide geological survey data and design information of landslide remediation engineering, the finite element model-based ANSYS software platform of anti-slide pile soil system is established. The numeric simulation results of pile and soil system under own weight condition proves the validity of the finite element model. Moreover, the density γ of landslide, cohesion c and internal friction angle ϕ of slide surface, and compression modulus E_s , four random variables of sliding bed, the reliability calculation model of anti-slide pile based on ANSYS software and JC method is established, and the corresponding algorithm is developed. The sample calculation shows that, the probability of failure of anti-slide pile structure $P_f=0.49\%$ and $\beta=2.58$, which is little larger than that of MCS Sampling method, and that of CCD Responding Surface method. The example verified the validity of the reliability model and corresponding algorithm.

Key words: reliability; JC method; anti-slide pile; loess landslide; ANSYS